

Ю.Н. Логинов, Д.О. Соболев

Особенности расчета усилия, необходимого для правки растяжением листов и плит из алюминиевых сплавов

Ключевые слова: упругая деформация, пластическая деформация, прокатка, листовой прокат, алюминиевые сплавы, правка растяжением.

Процесс правки проката растяжением часто описывают с достаточно простых позиций. Заготовка достаточно большой длины зажимается захватами растяжной машины и подвергается растяжению сначала в области упругих деформаций, а затем в области пластических деформаций. При более внимательном подходе процесс правки выглядит более сложным образом, на него влияют неоднородности структуры металла по всем трем координатам, а также анизотропия свойств [1–3].

Из-за малости пластических деформаций сопротивление деформации σ_s часто приравнивают к условному пределу текучести материала $\sigma_{0,2}$. Это дает возможность выполнить расчеты усилия правки P по простой формуле:

$$P = \sigma_{0,2} * F, \quad (1)$$

где F – площадь поперечного сечения заготовки, для плоского проката это площадь прямоугольника со сторонами ширины и толщины заготовки.

Использование условного предела текучести в качестве прочностной характеристики металла обусловлено ее доступностью: эта величина присутствует в справочниках и часто в нормативных документах – стандартах или технических условиях на продукцию. Если есть необходимость в использовании величины σ_s , то приходится ориентироваться на другие источники информации, причем по многим сплавам этих данных может не оказаться. Это обусловлено тем, что для определения сопротивления деформации придется применить иные методики, чем просто растяжение образца при малых деформациях.

Вместе с тем, технологическим регламентом обычно задается степень остаточной деформации, и она составляет совсем не 0,2 %, а поддерживается на уровнях: минимальное значение $\varepsilon_{\min} = 1,5$, $\varepsilon_{\max} = 3,0\%$. Выбор производится с учетом марки сплава и с учетом требований заказчика. Это позволяет достичь уровня пластической деформации, достаточной для исправления дефектов плоскостности по всему объему заготовки. Возникает вопрос, насколько могут отличаться результаты расчетов при использовании условного предела текучести либо сопротивления деформации.

В отличие от горячей или холодной прокатки процесс растяжения осуществляется при малых скоростях деформации. Это можно показать на следующем примере. Условия работы растяжной машины SMS Meer максимальным усилием 70 МН включают следующий диапазон регулирования: наименьшая линейная скорость растяжения составляет $v_{\min} = 3$ мм/с, наибольшая $v_{\max} = 18$ мм/с. При этом минимальная длина проката составляет $L_{\min} = 4000$, а максимальная $L_{\max} = 16000$ мм.

Тогда минимальная скорость деформации составит величину

$$\xi_{\min} = \varepsilon_{\min} * \frac{v_{\min}}{L_{\max}} = 0,015 * \frac{3 \frac{\text{мм}}{\text{с}}}{16000 \text{ мм}} = 2,8 * 10^{-6} \text{ с}^{-1}. \quad (2)$$

Здесь учтено, что при малых деформациях относительное удлинение примерно равно степени деформации. Кроме того, для расчета минимального значения функции в числитель включены минимальные значения параметров, в знаменатель – максимальные значения, а для расчета максимального значения функции расстановка параметров противоположная.

Соответственно максимальная скорость деформации окажется равной

$$\xi_{\max} = \varepsilon_{\max} * \frac{v_{\max}}{L_{\min}} = 0,030 * \frac{18 \frac{\text{мм}}{\text{с}}}{4000 \text{ мм}} = 1,4 * 10^{-4} \text{ с}^{-1}. \quad (3)$$

Таким образом, удалось установить, что диапазон скоростей деформации может составить $2,8 * 10^{-6} \text{ с}^{-1} \dots 1,4 * 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, то есть различие составляет два порядка. На фоне скоростей деформации при прокатке на уровне $10 \dots 100 \text{ с}^{-1}$ получены существенно меньшие величины.

В настоящее время большое внимание уделяется именно высокоскоростным процессам формоизменения с описанием поведения алюминиевых сплавов до скоростей деформации порядка 5000 1/с [4,5]. При этом меньше внимания уделяется описанию свойств при малых скоростях деформации. Мало того, практикуется мнение, что при холодном формоизменении скорости деформации не играет никакой роли.

Имеются требования стандарта на измерение величины условного предела текучести [6] в части ограничения скоростных параметров испытаний: от 0,00025 (или $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$) до 0,0025 с^{-1} (или $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$). Сравнение показывает, что минимальная скорость правки растяжением может оказаться ниже задаваемой стандартом на испытание образцов. При этом влияние скорости деформации на напряжение пластического течения может быть проиллюстрировано следующими примерами. В статье [7] приведены результаты испытания алюминиевого сплава 5052 (Al2,5Mg) при малых значениях скоростей деформации, что ближе всего подходит к условиям правки растяжением. На рис. 1 приведены кривые упрочнения этого сплава.

Здесь видно, что при изменении скорости деформации происходит смещение кривых упрочнения, причем как на начальной стадии, так и на конечной. При этом графики не эквидистантны и могут пересекаться. В частности, это говорит о том, что и условные пределы текучести, определенные при различных скоростях деформации, могут отличаться. Поэтому ситуация с точным определением характеристик упрочнения алюминиевых сплавов до конца не ясна.

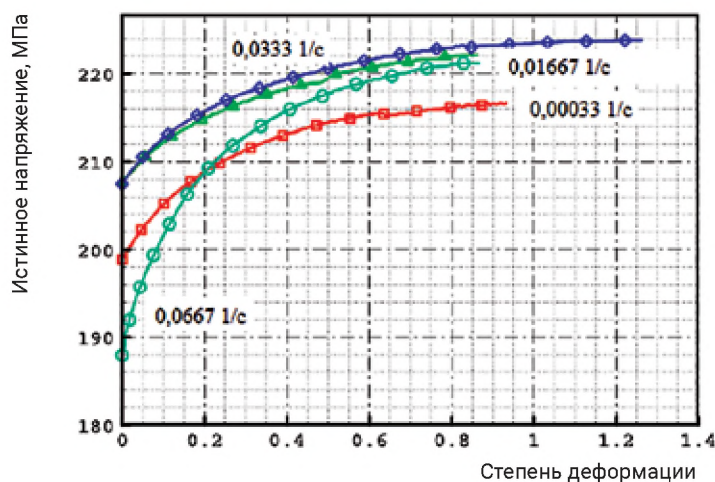


Рисунок 1. Кривые упрочнения для алюминиевого сплава 5052

Далее придется рассмотреть ситуацию, когда известными параметрами являются условный предел текучести и кривая упрочнения. Важным является вопрос, насколько можно допустить ошибку, заменяя в расчетах сопротивление деформации на величину условного предела текучести. Для этого придется рассмотреть ход кривой упрочнения при малых деформациях.

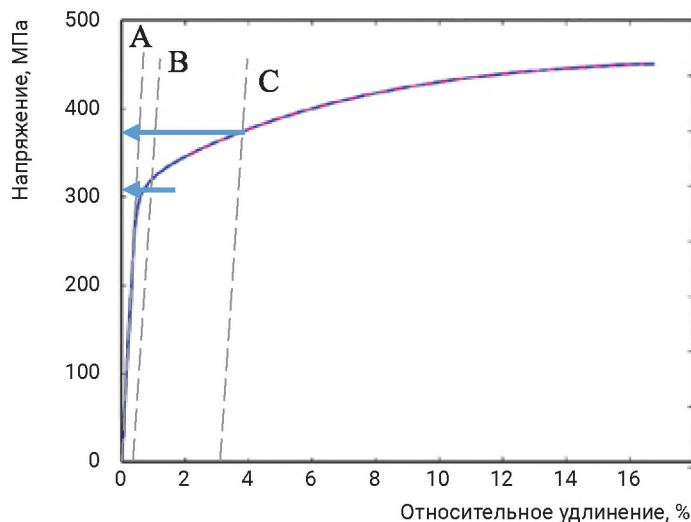


Рисунок 2. Диаграмма растяжения образца из алюминиевого сплава 2024

На графике проведены вспомогательные линии, линия А соответствует касательной к части графика, отвечающей за упругое нагружение, линия В – параллельна А и проведена на расстоянии 0,2% относительного удлинения, линия С проведена на расстоянии 3% относительного удлинения. Соответственно точки пересечения линий В и С с графиком напряжений будут соответствовать условному пределу текучести и напряжению правки растяжением. Условный предел текучести в результате оказался равен 305 МПа, что соответствует требованиям стандарта ASTM для заданного состояния (> 290 МПа) [9].

Сравнение напряжений показывает, что они отличаются на величину $100 \cdot (370 - 305) / 305 = 21\%$. Таким образом, ошибка расчета усилия правки может составить 21%. Она может оказаться и выше, если кривая упрочнения сплава пойдет под большим углом к оси абсцисс.

ВЫВОДЫ

Расчет усилий правки с использованием в качестве расчетного параметра условного предела текучести может давать заниженные результаты. Показано, что занижение может достигать величин более 20 %. Более правильным является использование в качестве прочностного параметра сопротивления деформации, определенного с учетом уровня остаточной деформации и скорости процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ремнев К.С. Устойчивость тонкой полосы из анизотропного материала при правке растяжением. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 4. С. 96-107.
2. Логинов Ю.Н., Буркин С.П., Сапунжи В.В. Влияние условий правки растяжением на точность размеров плоских полуфабрикатов. Теория и практика производства листового проката. Сборник научных трудов. Липецкий государственный технический университет. Липецк, 2003. С. 42-47.
3. Логинов Ю.Н., Буркин С.П., Сапунжи В.В. Влияние структуры прессованной полосы алюминиевого сплава 6061 на изменение ее поперечных размеров при правке растяжением. Цветные металлы. 2002. № 7. С. 71-74.
4. Yan S. L., Yang H., Li H. W., Yao X. Variation of strain rate sensitivity of an aluminum alloy in a wide strain rate range: Mechanism analysis and modeling. Journal of Alloys and Compounds, 2016. V. 688, Part A. P. 776-786.
5. Lee W.S., Sue W.C., Lin C.F., Wu C.J. The strain rate and temperature dependence of the dynamic impact properties of 7075 aluminum alloy. J Mater Process Technol, 2000. V. 100. P. 116-122.
6. Межгосударственный стандарт ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение (ИСО 6892–84). Группа В09.
7. Hosseini Kordkheili S. A., Ashrafian M. M., Toozandehjani H. A rate-dependent constitutive equation for 5052 aluminum diaphragms. Materials & Design. 2014. V. 60. P. 13-20.
8. Satyapriya Gupta, Armand Joseph Beaudoin, Juliette Chevy. Strain rate jump induced negative strain rate sensitivity (NSRS) in aluminum alloy 2024: Experiments and constitutive modeling. Materials Science and Engineering: A, 2017. V. 683. P. 143-152.
9. Электронный ресурс matweb.com. Aluminum 2024–T4; 2024–T351.
http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=67d8cd7c00a04ba29b618484f7ff7524

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЛОГИНОВ Юрий Николаевич, доктор технических наук, профессор, Уральский Федеральный университет
E-mail: j.n.loginov@urfu.ru

СОБОЛЕВ Даниил Олегович, магистрант, Уральский Федеральный университет
E-mail: me gasplaw@mail.ru